

**УДК 621.3**

*А.С. Затуленко, студентка гр.ПБ-91мп*  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

## **КЕРУВАННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИМ ДВИГУНОМ З ВИКОРИСТАННЯМ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ СЕРІЇ STM-32**

**Анотація.** У статті досліджено використання мікроконтролера серії STM-32 в системі керування п'єзодвигунами. Розглянуто спосіб зменшення небажаних пульсацій за рахунок використання в управлінні п'єзоактюатором третього стану широтно-імпульсної модуляції. Запропонована математична модель динаміки п'єзоактюатора при живленні від широтно-імпульсного модулятора із трьома станами, та розроблена функціональна схема цифрового п'єзоелектричного приводу, що представляє собою одноконтурну систему регулювання по заданому параметру.

**Ключові слова:** мікроконтролер серії STM-32, системи керування п'єзодвигунами, п'єзоелектричний привід.

### **ВСТУП**

У зв'язку з інтенсивним розвитком сучасного технологічного і дослідницького устаткування широке поширення одержали п'єзодвигуни. Внаслідок чого встає питання про керування п'єзодвигунами, як окремими елементами в електроніці.

Завдання вирішуються застосуванням сучасних лінійних підсилювачів і обладнання керування з вихідними каскадами на високовольтних транзисторах, що працюють у ключовому режимі, тобто використанням імпульсного обладнання, а також спеціалізованих драйверів для п'єзоелектричних виконавчих приладів.

Керування п'єзодвигунами в таких системах зазвичай виконується з використанням ШІМ (широтно-імпульсної модуляції), що, в свою чергу, викликає появу небажаних ударно-вібраційних ефектів.

Для подолання цих ефектів у виробках, працюючих в мікродіапазоні швидкостей, застосовують комбіновані алгоритми, які поєднують в собі як елементи безперервного керування шляхом сканування по частотній характеристиці двигуна, так і імпульсного – шляхом внутрішньої модуляції частоти збудження для виробів [1].

Іншим шляхом для подолання ударно-вібраційних ефектів є використання алгоритму із застосуванням третього стану ШІМ, в цьому разі синтез регулятора системи управління необхідно виконувати з урахуванням нелінійності рівняння динаміки об'єкта управління.

Сучасні мікропроцесорні системи керування, у тому числі і п'єзоелектричні виконавчі механізми, дозволяють реалізувати керування шляхом відповідного програмування із компенсацією зовнішніх впливів і нелінійності, властивих обладнанню даного типу.

Велика номенклатура мікроконтролерів дозволяє реалізовувати цифрове керування як одноконтурних приводів, так і більш складних багатоконтурних і багатопровідних систем і комплексів.

Метою роботи є розробка методу керування п'єзоелектричним двигуном з використанням широтно-імпульсної модуляції із трьома станами на базі мікроконтролерів серії STM-32.

## ОСНОВНА ЧАСТИНА

При проектуванні приводу рухомих елементів оптико-електронної системи, в числі інших методів [2, 3] розглянуто використання в системі управління п'єзоактюатора ШІМ з трьома станами, що дозволяє підвищити споживчі властивості п'єзоприводу за рахунок зниження паразитної вібрації об'єкту пересування і привнесення в систему властивості астатизма.

Для реалізації експерименту за методом управління п'єзоактюаторами з використанням ШІМ на базі мікроконтролера серії STM-32 прийнята функціональна схема цифрового п'єзоелектричного приводу (Рис.1), що представляє собою одноконтурну систему регулювання по заданому параметру.

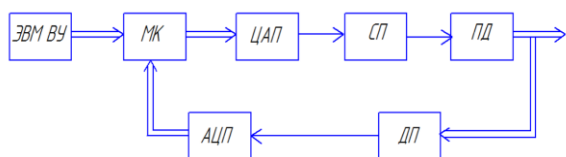


Рисунок 1. Функціональна схема цифрового п'єзоелектричного приводу

Схема містить дві частини – цифрову (мікроконтролер (МК)), обладнання зв'язку з мікроконтролером, аналого-цифровий перетворювач (АЦП), цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) і обчислювальна машина верхнього рівня

(ЕОМ ВР)) та аналогову (силовий перетворювач (СП), п'єзодвигун (ПД) і датчик параметру (швидкості, положення, температури тощо) (ДП)).

Контролер серії STM-32 (Рис. 2), призначений для використання в програмах, де потрібні більші обсяги пам'яті і підвищені швидкості роботи ядра.



Рисунок 2. Зовнішній вигляд мікроконтролера серії STM-32

Вибір контролера серії STM-32 обумовлено тим фактом, що цей контролер вже використовується в оптико - електронному пристрої для виконання інших завдань (обробці даних болометричної матриці). До його складу [4] входить таймер з розширеними функціями, призначений для забезпечення керування приводами,

містить шість комплементарних виходів ШІМ. Роботи з програмування мікроконтролера STM-32 проводились на технологічній платі для налаштування мікроконтролера в середовище STM32CubeIDE генерації коду від компанії ST.

Управління виконавчими механізмами здійснюється з використанням ШІМ. Вихідні силові транзистори підсилювачів потужності працюють в ключовому режимі, що дозволяє істотно підвищити КПД вихідного каскаду, знизити нагрів транзисторів і, як наслідок, значно зменшити габаритні розміри підсилювача. Пристрій формування керуючої напруги на електродах п'єзоактюатора при використанні широтно-імпульсної модуляції замінюється еквівалентною схемою (Рис. 3).

Вихідний каскад пристрою представлений двома послідовно включеними ключами SW1 і SW2 (верхній і нижній силові транзистори, що працюють в ключовому режимі). Значення залишкового опору включеного ключа, внутрішнього опору джерела живлення і додаткових, обмежуючих струм резисторів, визначають значення внутрішнього опору пристрою, еквівалентно представленого резистором  $R_y$ .

Джерело живлення характеризується постійною напругою  $U_n$ , а п'єзоактюатор в такій схемі еквівалентно представляється конденсатором PA. В експериментах з вибором оптимальної схеми керування п'єзодвигуном приводу

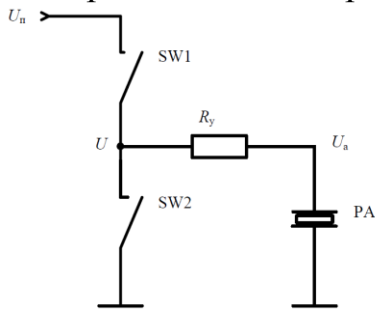


Рисунок 3. Еквівалентна схема формування керуючої напруги на електродах п'єзоактюатора при використанні ШІМ

елементів оптико-електронної системи розглянуто варіант управління п'єзоактюаторами от ШІМ з трьома станами. При використанні класичної ШІМ з двома станами, значення керуючого сигналу  $U_a$  на електродах п'єзоактюатора варіюється за рахунок зміни інтервалів часу протифазного включення/вимикання ключів SW1 і SW2, які характеризуються керуючим параметром  $\gamma \in [0,1)$ . Напруга  $U$  в точці з'єднання ключів SW1 і SW2 - періодична імпульсна. Напруга  $U_a$  на електродах п'єзоактюатора матиме періодичний пульсуючий компонент з періодом  $T$ , що призведе до небажаних періодичних коливань об'єкта мікропереміщення, як в перехідному, так і в сталому режимах роботи.

При керуванні швидкості широтно - імпульсною модуляцією відчутні ударно - вібраційні ефекти які, найчастіше, неприпустимі при роботі мікроманіпуляційної системи.

Існує спосіб [5] зменшення небажаних пульсацій за рахунок використання в управлінні п'єзоактюатором третього стану ШІМ.

У цьому стані обидва ключа SW1 і SW2 розімкнуті, а керуючий сигнал  $U_a$  зберігає постійне значення за рахунок власної ємності п'єзоактюатора.

При позитивної керуючої дії включається тільки SW1 на час  $\gamma T$  з подальшим переходом в третій стан.

При негативної керуючої дії включається тільки SW2 на час  $\gamma T$  з подальшим переходом в третій стан. Дискретна нелінійна модель динаміки об'єкту представлена рівнянням (1).

$$\left. \begin{aligned} X((n+1)T) &= e^{A_0(1-\gamma(nT))T} (e^{A\gamma(nT)T} X(nT) + A^{-1}(e^{A\gamma(nT)T} - I)BU_{\Pi}), \\ U &= \begin{cases} U_{\Pi} \Leftarrow x_3(nT) < V(nT), \\ 0 \Leftarrow x_3(nT) \geq V(nT), \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де:  $V(nT) = \gamma(nT)U_n$  – сигнал управління;

$T$  – постійний період сигналу широтно - імпульсного модулятора;

$t$  – час на інтервалі  $[0, T)$ .

$U(\tau)$  – управляючий сигнал;

$X(nT)$  – вектор стану дискретної системи на початок  $n$ -го періоду сигналу ШІМ;

$n=0,1,\dots$  – дискретний час управляючим параметром  $\gamma \in [0,1)$ .

Рівняння (1) дозволяє рекурентно обчислювати перехідну характеристику керованого п'єзоактюатора, виконувати синтез регуляторів і аналіз динаміки п'єзоприводів.

Переваги управління п'єзоактюатором від ШІМ з трьома станами у порівнянні з класичним управлінням:

- знижується рівень коливання при переміщенні корисного навантаження;
- у п'єзоактюатора за рахунок накопичення електричного заряду з'являється астатична властивість, тобто управління здійснюється не величиною переміщення корисного навантаження, а швидкістю;
- аналіз умов комутації ключів показує, що алгоритм роботи ШІМ з трьома станами не допускає можливості виникнення наскрізних струмів в силових ключах.

## ВИСНОВКИ

1 Математична модель динаміки п'єзоактюатора при живленні від широтно-імпульсного модулятора із трьома станами, яка визначена рівнянням (1) коректна та реалізовано на базі мікроконтролера серії STM32.

2 Наявність в модуляторі третього стану породжує параметричну нестационарність. Розроблена модель дозволяє врахувати зазначені ефекти при синтезі систем керування.

3 При проектуванні приводу рухомих елементів оптико-електронної системи доцільно, в числі інших методів, розглянути можливість використання в системі управління п'єзоактюатору ШІМ з трьома станами, що дозволяє підвищити характеристики п'єзоприводу за рахунок зниження паразитної вібрації об'єкту пересування і привнесення в систему властивості астатизма.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Петренко С.Ф. Исследование сопутствующего ударно-вибрационного шума пьезоэлектрического двигателя в режиме микро- и наноскоростей / С.Ф. Петренко, А.В. Омелян, А.Н. Лысенко, В.С. Антонюк // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського": Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – Київ – № 78 (2019). 2019 – С.- 67–73. • DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.78.67-73>
- [2] Петренко. С.Ф., Омелян А.В., Антонюк В.С., Новаковський О.Г. Система керування п'єзоелектричним двигуном // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»: Серія приладобудування. – 2018. – Вип.55(1) . - С. 5 – 10. DOI: [https://doi.org/10.20535/1970.55\(1\).2018.135857](https://doi.org/10.20535/1970.55(1).2018.135857)
- [3] Petrenko, S.F., Omelyan, A.V.a, Antonyuk, V.S., Novakovskiy, O.G. Comparison of piezoelectric and DC motor control principles // Journal of Nano- and Electronic Physics Volume 10, Issue 5, 2018, Номер статті 05032 • DOI:10.21272/jnep.10(5).05032
- [4] Описание микроконтроллера STM32F407/417 [Электронный ресурс]. URL: [www.st.com/web/en/catalog/mmc/FM141/SC1169/SS1577/LN11-85](http://www.st.com/web/en/catalog/mmc/FM141/SC1169/SS1577/LN11-85)
- [5] Бойков В.И., Быстров С.В., Королёв А.Ю. Динамика пьезопривода с управлением от широтно-импульсного модулятора с тремя состояниями // Известия высших учебных заведений. Приборостроение - 2013. - Т. 56. - № 4. - С. 81

*Наук. керівник – д.т.н. Антонюк В.С.*